

На правах рукописи



ИГНАТКОВ Кирилл Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНО-ИНТЕГРАЛЬНЫХ АВТОДИННЫХ
МОДУЛЕЙ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего профессионального образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина» (УрФУ)

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Носков Владислав Яковлевич,

Официальные оппоненты:

Данилин Александр Иванович,

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэро-
космический университет им. Академика С.П. Королева (Национальный исследова-
тельский университет)», заведующий кафедрой радиотехники

Усанов Дмитрий Александрович,

доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Саратовский го-
сударственный университет имени Н.Г. Чернышевского», заведующий кафедрой
физики твёрдого тела

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени
Н.Э. Баумана».

Защита состоится 26 декабря 2014 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.285.11 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет име-
ни первого Президента России Б. Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург,
ул. Мира, д. 32, ауд. Р-217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/glavnaja/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зраенко Сергей Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Автодины являются простейшими приёмо-передающими устройствами, функционально представляющими собой лишь совокупность автогенератора и средств выделения автодинного отклика. Принцип действия этих устройств основан на автодинном эффекте, состоящем в изменениях параметров колебаний генератора под воздействием собственного отражённого от объекта локации излучения или информационного излучения от стороннего источника. Автогенератор в этих устройствах выполняет одновременно функции радиопередающего устройства и приёмника. Простота конструкции автодинов обеспечивают низкую стоимость, малые габариты и массу приёмо-передающих модулей.

Отмеченные качества автодинов и их многофункциональность являются привлекательными для их применения во многих областях человеческой деятельности. Поэтому за более чем столетнюю историю становления и развития теории и техники автодинов к ним наблюдается устойчивый интерес большого числа исследователей. Количество публикаций, посвящённых изучению автодинного эффекта в различных генераторах и применению автодинов в решении прикладных задач, неуклонно растёт.

Первым исследовал «автодинный метод приёма» и описал работу этого устройства в своей заявке на изобретение инженер английской компании «Marconi's Wireless Telegraphy» Генри Раунд (Henry Joseph Round) в 1913 г. Следующим наиболее значительным этапом развития автодинов явилось их использование в качестве датчика близости цели для неконтактных взрывателей боеприпасов в годы Второй мировой войны. Данное применение автодинов явилось мощным толчком к развитию целых направлений в электронной технике, освоению новых передовых технологий в приборостроении и военной технике, теоретической базы автодинов, а также проложило путь к миниатюризации, которая вошла в электронную промышленность и создала предпосылки для нынешней эры интегральных схем.

За прошедшее столетие автодинная тематика сложилась в самостоятельное динамично развивающееся научное направление, которое во всех промышленно развитых странах постоянно поддерживается на высоком уровне. В последние десятилетия появился интерес к автодинной тематике также в странах бывшего «третьего мира», таких как: Бразилия, Индия, Южная Корея и Иран. Среди отечественных учёных основоположниками данного научного направления являются Е.К. Алахов, Л.И. Берштейн, Е.К. Завойский, С.И. Зилитинкевич, И.М. Коган, О.В. Лосев и А.Ф. Терещенко. Значительный вклад в развитие данной тематики в нашей стране внесли научные коллективы под руководством Е.М. Гершензона, В.М. Богачёва, В.В. Болознева, В.Я. Носкова, С.М. Смольского, Б.Н. Туманова, Д.А. Усанова, Ю.Л. Хотунцева, Б.И. Шахтарина и других. Наиболее известными учёными ближнего зарубежья являются: Ю.Е. Гордиенко, Г.П. Ермак и К.А. Лукин (Украина).

Научная проблема, решению ряда задач которой посвящена настоящая диссертационная работа, связана с проведением исследований автодинных приёмо-передающих устройств миллиметрового (крайне высокочастотного – КВЧ, от 30 до 300 ГГц) диапазона. Данные устройства по сравнению с автодинами диапазона

СВЧ (от 3 до 30 ГГц), имеют качественные отличия в своём функционировании, а также в методах подхода к их анализу.

Первые же результаты исследований автодинов КВЧ диапазона, полученные на рубеже 70-80-х годов прошлого века, обнаружили новое явление в виде ангармонических искажений сигналов, которое не вписывалось в существовавшие в то время теоретические представления. Поэтому данное явление вызвало оживлённую дискуссию в научном сообществе, результаты которой выявили потребность в разработке новой теории автодинов, учитывающей специфику их работы в КВЧ диапазоне. В настоящее время работа над этой теорией ещё не завершена.

В связи с этим актуальность решения указанной проблемы обусловлена потребностями дальнейшего развития и обобщения теории работы автодинных приёмо-передатчиков КВЧ диапазона. Данная теория необходима для анализа и расчёта параметров и характеристик этих устройств, включая методику инженерных расчётов с нахождением режимов наилучшей работы, поиска оптимальных режимов работы и новых схемотехнических решений, а также правильного их использования в перспективных системах радиолокации, дистанционного зондирования атмосферы, связи, метрологии и других. Решение этой проблемы находится в соответствии с общими тенденциями развития радиоэлектроники, направленными на освоение КВЧ и более высокочастотных диапазонов, а также миниатюризацию компонентов и устройств.

В русле указанных тенденций к настоящему времени зарубежными фирмами создана широкая номенклатура радиокомпонентов СВЧ и КВЧ диапазонов для систем связи и радиолокации, среди которой значительную долю составляют генераторные и генераторно-излучающие (автодинные) модули, в том числе, в виде готовых микросхем для поверхностного монтажа. Схемные и конструкторские решения этих модулей защищены большим числом патентов в наиболее развитых странах мира: Японии, ЕС, США и Китай.

В нашей стране в соответствии с планами конверсии производства СВЧ техники на рубеже 80-90-х годов прошлого века в НИИПП (г. Томск) были созданы первые образцы гибридных интегральных схем (ГИС) автодинных модулей 5-мм диапазона типа «Тигель-05». Данные модули благодаря созданию нового типа активного элемента, выполненного на базе мезапланарных ганновских структур, и развитию физико-технологических основ их производства по своим параметрам и характеристикам в те годы не уступали лучшим зарубежным образцам.

Возможности использования автодинов в продукции как военного (например, в радиовзрывателях), так и гражданского, в том числе в медицине и на транспорте, открывало перспективы массового производства автодинных приёмо-передающих модулей. В последующие годы эти модули, несмотря на объективные трудности девяностых годов, были усовершенствованы, появлялись новые типы и их разновидности («Тигель-08», «Тигель-08М»), расширился частотный диапазон работы. Несомненная заслуга в создании этих модулей, проведении комплекса исследований и поиске их практического использования в различных областях науки и техники принадлежит С.Д. Воторопину.

За прошедшие годы выполнен большой объём исследований различных автодинных генераторов КВЧ диапазона, в том числе гибридно-интегральных модулей

«Тигель». В публикациях, посвящённых автодинам, рассмотрены особенности формирования сигнальных характеристик в различных режимах работы, исследованы условия регистрации автодинного отклика в цепи питания генератора, а также при использовании внешнего детектирования. Изучены особенности работы автодинов в режимах с амплитудной, частотной, радиоимпульсной и комбинированными видами модуляции излучения. Выполненные исследования позволили создать большое число различных КВЧ датчиков, измерителей параметров технологических процессов и устройств контроля качества материалов, систем ближней радиолокации (СБРЛ) для транспорта, промышленности и научных исследований.

Однако, несмотря на большой объём выполненных исследований, основные параметры и характеристики автодинов до настоящего времени с общих позиций влияния на них внутренних параметров генераторов изучены недостаточно. При этом сами параметры генераторов, которые необходимы для адекватного описания поведения автодинов в диапазоне КВЧ, до настоящего времени полностью не определены. Большое практическое значение при решении задачи применения автодинов в СБРЛ имеют также результаты исследований формы автодинного отклика и разности фаз между сигналами, шумовых параметров и характеристик, а также условий устойчивости автодинов в зависимости от внутренних параметров используемых генераторов, режима работы и множество других. Кроме того, в плане поиска технических решений для дальнейшего улучшения параметров и расширения области применения автодинов представляется перспективным исследование стабилизированных по частоте КВЧ генераторов посредством внешнего высокочастотного резонатора.

Таким образом, тема диссертации, посвящённая исследованиям указанных выше аспектов функционирования автодинных гибридно-интегральных модулей КВЧ диапазона, находится в русле общих тенденций развития теории и техники автодинов и является актуальной. Результаты этих исследований представляют научный и практический интерес и являются востребованными при создании новых типов автодинных ГИС и модулей, а также их использовании в перспективных системах ближней радиолокации, связи, метрологии и радиозондирования атмосферы.

Цель работы и задачи исследования

На основании вышеизложенного была сформулирована цель диссертационной работы: выполнить теоретические и экспериментальные исследования сигнальных и флуктуационных параметров и характеристик обычных и стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором автодинных модулей, изготовленных с применением гибридно-интегральной технологии на основе мезапланарных диодов Ганна КВЧ диапазона, необходимых для выработки рекомендаций по созданию перспективных автодинных модулей и методики их расчёта, а также найти применение полученным результатам исследований в системах радиолокации, связи, метрологии и зондирования атмосферы.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ современного состояния теории и техники автодинных систем, обобщить полученные данные и накопленный опыт предшествующих исследований с целью выбора наиболее адекватного описания физических процессов в исследуемых генераторах.

2. Разработать математическую модель одноконтурных КВЧ генераторов, находящихся под воздействием собственного отражённого излучения и источника внутренних шумов малого уровня по сравнению с амплитудой колебаний и выполнить теоретический анализ сигнальных и флуктуационных параметров и характеристик.
3. На основе разработанной модели автодинного генератора со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором выполнить анализ особенностей сигнальных и флуктуационных параметров и характеристик этих генераторов.
4. С целью проверки основных выводов теоретического анализа выполнить сравнительные экспериментальные исследования обычных и стабилизированных по частоте автодинных модулей.
5. Прикладной задачей диссертации являются разработка, создание и испытание автодинных датчиков для контроля параметров движения отражающих объектов, использующих результаты диссертационных исследований, и выработка основных рекомендаций по созданию перспективных автодинных модулей КВЧ диапазона и их использованию в различных системах ближней радиолокации, связи и радиозондирования атмосферы.

Методы исследований

Для формирования математической модели автодина использован метод эквивалентных схем. Упрощение полученных нелинейных уравнений для мгновенных значений токов и напряжений выполнялось с использованием методов, известных в теории нелинейных колебаний как медленно меняющихся амплитуд, усреднения, квазилинейный, метод бифуркаций. Исследование устойчивости автодинного генератора, находящегося под воздействием собственного отражённого излучения, выполнено с применением метода Ляпунова. При анализе автодинов в условиях слабого воздействия на генератор отражённого излучения и шумов использованы методы возмущений, состоящие в линеаризации нелинейных характеристик системы в окрестности стационарного режима. При анализе флуктуационных характеристик использованы методы статистической радиотехники. Решение сложных систем уравнений находилось численными методами с привлечением пакета программ в среде MathCAD. При проведении экспериментальных исследований использовались методы лабораторного и натурного эксперимента, полунатурного моделирования, простейшие методы аналоговой и цифровой обработки сигналов, а также с привлечением компьютерной обработки сигналов с помощью виртуальных приборов, создаваемых в среде программирования LabVIEW.

Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Автодинный генератор, находящийся под воздействием собственного отражённого от объекта локации излучения, по отношению к изменениям режима стационарных колебаний может быть представлен в виде системы с внутренней и внешней обратной связью, в которой внешняя обратная связь обусловлена запаздывающим воздействием отражённого излучения, а внутренняя обратная связь – неизодромностью и неизохронностью генератора.

1.1. Необходимым условием устойчивости автодинной системы, кроме известного требования к знаку прочности предельного цикла генератора (он должен быть положительным), являются требования к величинам параметров внешней и внут-

ренной обратной связи: они должны быть не более единицы.

1.2. Основные параметры автодинной системы, такие как коэффициенты автодинного усиления, девиации частоты и автодетектирования, зависят не только от прочности предельного цикла, добротности колебательной системы и коэффициента амплитудного детектирования соответственно, но и параметров внутренней обратной связи автодина, которые в случае положительного значения коэффициента обратной связи имеют дополнительное (регенеративное) усиление.

1.3. Степень ангармонических искажений сигнальных характеристик автодина зависит не только от величины параметра внешней обратной связи (с увеличением этого параметра они растут), но и от внутренних параметров генератора, которые оказывают влияние также на относительное фазовое смещение этих характеристик.

2. В случае сильной обратной связи, когда величина параметра внешней обратной связи соизмерима с единицей, в автодине за счёт мультипликативного преобразования частотного шума генератора наблюдается периодическая, кратная половине длины волны излучения нестационарность среднеквадратических уровней шумов, которая выражается в их зависимости от положения отражающего объекта. При этом в одних положениях отражателя уровни шума по отношению к случаю слабой обратной связи могут заметно снижаться, а в других – значительно расти, причём увеличению уровня шума соответствует более крутые участки частотной характеристики автодина, а его уменьшению – более пологие.

2.1. Среднее значение уровня шума за период автодинного сигнала во всех случаях, как слабой, так и сильной обратной связи, сохраняется практически неизменным и равным уровню шумов автономного генератора.

3. Стабилизация частоты автодинного генератора с помощью внешнего высокودобротного резонатора обеспечивает значительное уменьшение степени искажений сигналов и уровня частотных шумов, что способствует улучшению такого важного параметра автодинной СБРЛ, как динамический диапазон. Выигрыш в динамическом диапазоне, определяемом величиной коэффициента стабилизации частоты, может составлять при сильной связи между резонаторами 20...30 и более дБ.

3.1. Ангармонические искажения сигналов стабилизированного автодина, которые наблюдаются при увеличении уровня отражённого излучения, в отличие от обычных (нестабилизированных) автодинов, обусловлены частотной дисперсией резистивной проводимости колебательной системы в окрестности собственной частоты стабилизирующего резонатора.

4. При проведении вибрационных измерений с помощью автодинных датчиков в условиях сильной обратной связи из-за наличия ангармонических искажений сигнальных характеристик необходимо учитывать не только значительные отличия величины чувствительности датчика к перемещениям и ширины динамического диапазона его работы в различных рабочих точках, но и отличия в этих точках уровней шума и продуктов нелинейного преобразования.

Достоверность защищаемых положений и результатов обеспечивается качественным и количественным соответствием теоретических выводов данным, полученным экспериментально, корректностью упрощающих предположений, применяемых при построении математических моделей, использованием стандартной измерительной аппаратуры и подтверждается успешным практическим использо-

ванием в реализованных устройствах и системах. Полученные результаты теоретического анализа проверялись на сходимость с результатами предшествующих исследований. Точность экспериментальных результатов обеспечивается использованием стандартной контрольно-измерительной аппаратуры и методов измерений. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях и симпозиумах, а также публикациями в рецензируемых журналах.

Новизна защищаемых положений и результатов диссертации

1. При анализе математической модели автодинного генератора показано, что одновременный учёт неизохронности и неизодромности генератора эквивалентен наличию в автодинной системе *внутренней обратной связи* [1, 2, 5]. В связи с этим запаздывающая на время распространения излучения до отражающего объекта и назад в генератор обратная связь в автодинной системе названа *внешней* [5].

Учёт внутренней обратной связи в модели автодина позволил установить дополнительное условие (внутренней) устойчивости автодинной системы [1, 6], показать влияние этой обратной связи на основные параметры (коэффициенты автодинного усиления, девиации частоты и автодетектирования) [1] и на особенности формирования автодинных характеристик [1, 22].

Выполнено исследование особенностей формы АЧХ и ХАЧ, а также поведения изображающей точки на этих характеристиках в зависимости от внутренних параметров генератора и параметров внешней обратной связи автодинной системы [2].

2. Разработана математическая модель автодинной системы, учитывающая одновременное воздействие на генератор отражённого от объекта излучения и собственных шумов [5, 21, 24]. Предложен метод анализа, позволивший установить основные закономерности формирования автодинных и шумовых характеристик при различных условиях, объяснить экспериментально наблюдающуюся периодическую нестационарность уровня шумов, рассчитать энергетический потенциал и динамический диапазон автодинной системы [5, 21, 24].

3. На основе полученных соотношений для анализа автодинного эффекта в генераторе, стабилизированном внешним высокودобротным резонатором, проведено рассмотрение широкого круга вопросов, связанных с особенностями формирования автодинных и шумовых характеристик, которые позволили определить возможности и перспективы дальнейшего развития теории и практики автодинов КВЧ диапазона в данном направлении [3, 4, 7, 8, 10-15].

4. Выполненные исследования особенностей формирования сигнальных и шумовых характеристик автодинов позволили найти решения ряда прикладных задач, в которых нашли применение результаты диссертационных исследований. К ним относятся:

- развитие методов расчёта параметров генераторов, характеризующих их внутренние свойства [1, 2, 27, 28];

- исследование вопросов эффективности и особенностей применения стабилизированных по частоте автодинов в СБРЛ [11-13].

- автодинный радиолокатор для измерения параметров движения вагонов на парковых путях сортировочной станции [16, 17];

— исследование нелинейных искажений сигналов и шумовых характеристик автодинных датчиков вибраций [23-25];

— применение автодинного генератора в качестве бортового приёмника для аэрологических радиозондов [18-20].

Научная ценность защищаемых положений и результатов диссертации

Научная ценность работы состоит в том, что в ней в рамках единого методологического подхода к решению задачи анализа автодинных генераторов КВЧ диапазона разработана теория их функционирования, которая обеспечивает возможность учитывать различные параметры и характеристики активных элементов и колебательной системы генераторов, а также произвольное время запаздывания отражённого излучения.

Выполненные на базе разработанной теории исследования параметров и характеристик обычных (нестабилизованных) автодинных модулей обобщают и развивают результаты предшествующих исследований автодинов с одноконтурной колебательной системой.

Результаты исследований автодинных генераторов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором являются полностью оригинальными и существенно развивают и дополняют теорию автодинных систем. Результаты этих исследований для случая отсутствия воздействия отражённого излучения согласуются с известными в литературе данными, полученными для стабилизированных автономных генераторов.

Разработанная теория работы как обычных, так и стабилизированных автодинов обеспечивает возможность создания систем и устройств на их основе с улучшенными параметрами и характеристиками, а также с более широкими функциональными возможностями, что является вкладом в прикладных областях науки и техники.

Практическая значимость работы

1. Результаты выполненных в диссертации исследований позволяют, исходя из заданных параметров используемых генераторов, рассчитать сигнальные и шумовые параметры и характеристики автодинов, необходимые для их правильного использования в перспективных автодинных системах радиолокации, связи, зондирования атмосферы и других. Решение обратной задачи по определению эквивалентных параметров автодинного генератора с помощью экспериментально полученных автодинных характеристик также представляет практический интерес для контроля качества выпускаемых промышленностью модулей и исследования свойств активных элементов.

2. Применение в предлагаемых для производства новых типах автодинных модулей стабилизации частоты с помощью внешнего высокочастотного резонатора значительно уменьшает девиацию частоты генерации под воздействием отражённого излучения, а также её нестабильность в диапазоне температур. Данные модули при их использовании в автодинных системах обладают по отношению к нестабилизированным генераторам улучшенными техническими характеристиками по такому важному показателю, как динамический диапазон, на 20-30 дБ. Некоторое увеличение энергетического потенциала (2-5 дБ), отсутствие периодической нестационарности шумов, а также (за счёт улучшения температурной стабильности час-

тоты) повышение точности измерения скорости объектов локации, являются дополнительными преимуществами этих модулей. Указанные достоинства стабилизированных модулей способствуют повышению спроса на них и расширению базы потребителей.

3. Разработан измерительный стенд на современной элементной базе с компьютерной обработкой и представлением информации, позволяющий регистрировать особенности формы и спектра автодинных откликов на воздействие излучения, отражённого от равномерно движущегося, а также от вибрирующего объекта. Данный стенд обеспечивает более высокую информативность, точность и оперативность получения результатов экспериментальных исследований.

4. Разработанные образцы автодинных радиолокаторов для определения параметров движения вагонов на сортировочной станции за счёт применения автодинного приёмо-передающего модуля обеспечивают более низкую себестоимость их изготовления по сравнению с радиолокатором с гомодинным построением приёмо-передатчика.

5. Разработаны методические рекомендации по выбору способа и режима регистрации, а также рабочей точки при использовании автодина в качестве датчика параметров вибраций. Учёт этих рекомендаций обеспечивает повышение точности и расширение динамического диапазона измерений. Реализуемый при этом выигрыш рассчитывается для конкретных условий измерений по полученным в диссертации формулам и использованием данных из представленных графиков.

Внедрение результатов диссертации и рекомендаций по их дальнейшему использованию

Результаты работы получены в ходе выполнения:

– договора № 13.G25.31.0008 от 07 сентября 2010 г. «Создание и производство технических средств радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС с целью модернизации технологической базы аэрологической сети Росгидромета» и НИОКР № 57/03111 от «07» июля 2010 г. «Исследование и разработка системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых платформ GPS/ГЛОНАСС, модернизация радиозондов типа МРЗ-3 для аэрологической сети Росгидромета», проводимых в рамках государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218;

– НИР «Исследование и экспериментальная проверка возможности применения сканирующих лазерных дальномеров для определения координат вагонов в парках станции («СКАЛА»», 2.083, НИР по договору № 919 от 28 сентября 2012 года с ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»);

– НИР «Исследование гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона» по договору о научно-техническом сотрудничестве между ОАО «Научно-исследовательским институтом полупроводниковых приборов» (ОАО «НИИПП», г. Томск) и Институтом радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ (ИРИТ-РТФ) УрФУ № 3302-34/02 от 06 ноября 2013 г, а также в учебном процессе ИРИТ-РТФ УрФУ.

Большинство результатов диссертации, полученных в ходе выполнения указанных выше НИОКР и НИР в период 2010–2014гг., доведены до инженерных решений, использованных при разработке образцов автодинных датчиков, и практических рекомендаций по созданию более совершенных автодинных модулей в гибридно-интегральном исполнении, переданных в ОАО «НИИПП» в виде отчёта за первый этап (2013 г.) выполнения НИР (№ гос. регистрации 01201450593). Получено 3 акта и одна справка об использовании результатов диссертации.

Апробация результатов работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 28 печатных работ, среди которых 7 статей в журналах, включённых в перечень ВАК, из них 2 статьи вышли в переводных журналах и учтены международной системой цитирования SCOPUS. 4 статьи вышли в прочих журналах, из них 3 – на английском языке. Сделано 17 докладов на различных конференциях, из них 12 вошли в международную базу цитирования SCOPUS. Материалы работы отражены также в одном отчёте о НИОКР и одном – о НИР.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих симпозиумах и конференциях: 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиовысотометрия-2010», Каменск-Уральский, 2010; 9-я Международная научно-практическая конференция «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments-2010», Москва, 2010; 17-я Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, 2011; Международная научно-практическая конференция «СВЯЗЬ-ПРОМ-2011», Екатеринбург, 2011; 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2011; 10-я Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Самара, 2011; 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2012; 11-я Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Екатеринбург, 2012; 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2013; 4-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиовысотометрия-2013», г. Каменск-Уральский, 2013; 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь, 2014.

Личный вклад диссертанта

В диссертации представлены только те результаты работы, в которых автору принадлежит определяющая роль. Постановка задач исследований осуществлялась научным руководителем д.т.н., профессором В.Я. Носковым. Ряд докладов на конференциях представлены автором единолично, шесть докладов в соавторстве с сотрудниками научной группы. Основная часть работ опубликована в соавторстве с научным руководителем, а также с д.т.н., профессором С.М. Смольским (МЭИ, Москва). В совместных работах диссертант принимал участие в разработке математических моделей, выполнении расчётов и экспериментов, при обсуждении работы осуществлял объяснение и интерпретацию результатов исследований.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Она изложена на 168 страницах, содержит 61 рисунок и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, указаны применяемые методы исследований, сформулированы цель работы, основные задачи исследования, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту. Кроме того, аргументирована достоверность исследований, отмечена практическая значимость работы, указано, где реализованы результаты работы, перечислены мероприятия, на которых проводилась апробация работы, приведены сведения о публикациях по теме диссертации, указан личный вклад автора, приведена структура диссертации.

В первой главе выполнен обзор известных из литературы наиболее интересных конструкций генераторных, генераторно-излучающих и автодинных модулей, опыт конструирования которых представляется полезным при разработке перспективных автодинных генераторов КВЧ диапазона; проведен анализ состояния проблемы исследования автодинов СВЧ и КВЧ диапазонов с колебательной системой, эквивалентной простейшему колебательному контуру; представлен анализ литературы, посвящённой стабилизации частоты СВЧ и КВЧ генераторов с помощью внешнего высокочастотного резонатора, а также автодинов с многоконтурной колебательной системой.

На основе изученных материалов установлено, что из отечественных серийно выпускаемых автодинных модулей наибольший интерес для выполнения исследований представляют модули «Тигель-08», изготовленные на основе многомезовых планарных диодов Ганна 8-мм диапазона. Установлено также, что вопросы теоретического и экспериментального исследования автодинных генераторов со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором по сравнению с широко известными одноконтурными автодинами освещены недостаточно.

В главе 2 представлены результаты исследований автодинных параметров и характеристик СВЧ генераторов, находящихся под воздействием собственного отражённого излучения малого уровня по сравнению с амплитудой колебаний. Установлены основные зависимости этих характеристик от внутренних параметров одноконтурных автодинных

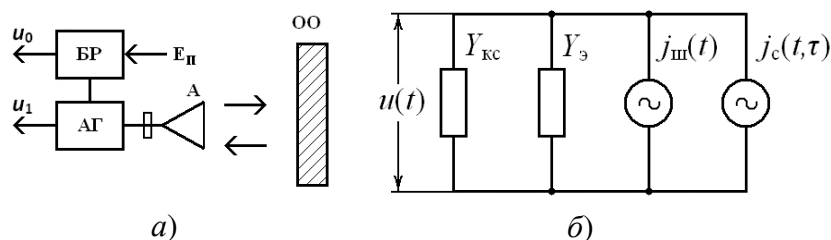


Рис. 2.1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы автодина: А – антенна; АГ – автодинный генератор; БР – блок регистрации автодинного отклика; ОО – отражающий объект локации

автодинных генераторов (АГ). Для этого использованы функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы (см. рис. 1).

Эквивалентная схема АГ, приведённая к плоскости активного элемента (АЭ), представлена на рисунке 2.1, б. На этой схеме по высокой частоте элемент $Y_{\text{КС}}$ отобра-

жает проводимость колебательной системы (КС), которая включает в себя также проводимость нагрузки $Y_{\text{н}}$; эквивалентные источники мгновенного тока внутрен-

них шумов $j_{ш}(t)$ АГ и воздействия собственного отражённого от объекта излучения $j_c(t, \tau)$, которое запаздывает относительно текущего времени t на время $\tau = 2l/c$, где l – расстояние до отражающей поверхности; c – скорость распространения электромагнитного излучения.

Для представленной на рис. 2.1 цепи получена система линеаризованных уравнений в окрестности стационарного режима колебаний АГ для определения относительных вариаций амплитуды a_1 и частоты генерации χ , а также выходного сигнала автодетектирования i в виде (здесь и далее сохранена нумерация формул из диссертации) [1,5,6]:

$$\frac{Q_n}{\omega_0} \frac{da_1}{dt} + \alpha_{11}a_1 + \varepsilon_{11}\chi = \Gamma(t, \tau)\eta \cos \delta(t, \tau) + a_c(t), \quad (2.10)$$

$$\beta_{11}a_1 + \xi_{11}\chi = -\Gamma(t, \tau)\eta \sin \delta(t, \tau) - a_s(t), \quad (2.11)$$

$$\alpha_{01}a_1 + \varepsilon_{01}\chi = i, \quad (2.12)$$

где α_{11} – приведенная крутизна инкремента АГ, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла; ε_{11} – параметр, определяющий неизоморфность АГ, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через проводимость АЭ и (или) параметры КС ε_{11} ; β_{11} – параметр, который определяет неизохронность АГ; $\xi_{11} = \xi_3 + \xi_{kc}$ – параметр стабилизации частоты АГ, учитывающий частотную крутизну реактивной проводимости АЭ ξ_3 и КС $\xi_{kc} = Q_n$; Q_n , $Q_{вн}$, $\eta = Q_n / Q_{вн}$ – нагруженная и внешняя добротности и кпд КС; α_{01} – безразмерный параметр, учитывающий явление автодетектирования вариаций амплитуды колебаний; ε_{01} – параметр «частотного детектирования», определяющий вклад вариаций частоты генерации в вариации тока питания АЭ; $\Gamma(t, \tau) = \Gamma [A(t, \tau) / A(t)]$ – модуль и $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$ – фаза некоторой функции, имеющей смысл мгновенного значения коэффициента отражения; Γ – приведённый к «зажимам» генератора коэффициент отражения, характеризующий относительное затухание излучения по амплитуде при его распространении до объекта и обратно; $A(t)$, $A(t, \tau)$ и $\Psi(t)$, $\Psi(t, \tau)$ – амплитуды и полные фазы колебаний генератора в текущий момент времени и из предыстории системы; $i_c(t)$, $i_s(t)$ – синфазная и ортогональная составляющие нормированного внутреннего шума АГ. Физический смысл входящих в систему (10) – (12) параметров более подробно раскрыт в диссертации. Обычно в СВЧ и КВЧ генераторах выполняется неравенство $\xi_3 \ll \xi_{kc} = Q_n$. Поэтому в дальнейшем при анализе одноконтурных АГ будем полагать $\xi_{11} = Q_n$.

Из уравнений (10), (11), используя метод Ляпунова, получены следующие условия устойчивой работы автодина [6]:

$$1) \alpha_{11} > 0; 2) (1 - \eta\rho) > 0; 3) 1 + C_{oc} \cos(\omega_0\tau + \theta) > 0, \quad (2.23)$$

где $C_{oc} = \Delta\omega_{ма}\tau$ – параметра внешней обратной связи автодинной системы [1,5,27], физический смысл его – индекс фазовой модуляции сигнала, обусловленный автодинными изменениями частоты автоколебаний [1,5]:

$$C_{oc} = (2\pi\Gamma N / Q_{BH}) \sqrt{1 + \gamma^2} / (1 - \gamma\rho); \quad (2.24)$$

$\Delta\omega_{ma}$ – автодинная девиация частоты; $\gamma = \beta_{11}/\alpha_{11}$ и $\rho = \varepsilon_{11}/Q_H$ – коэффициенты неизохронности и неизодромности соответственно; $N = 2l/\lambda$ – целое число полуволн, укладываемых между отражающим объектом и АГ; λ – длина волны излучения.

Используя квазистатический метод решения системы дифференциальных уравнений (10)–(12), полагая $a_c(t) = a_s(t) = 0$, получены выражения для относительных изменений сигнала автодетектирования $i \equiv i_H(\tau_H)$, амплитуды $a_1 \equiv a_H(\tau_H)$ и частоты $\chi \equiv \chi_H(\tau_H)$ колебаний, которые после нормировки имеют вид:

$$i_H(\tau_H) = i(\tau_H) / i_{0m} = \cos[\delta(\tau_H) - \psi_0], \quad (2.29)$$

$$a_H(\tau_H) = a_1(\tau_H) / a_{1m} = \cos[\delta(\tau_H) - \psi_1], \quad (2.30)$$

$$\chi_H(\tau_H) = \chi(\tau_H) / \chi_m = -\sin[\delta(\tau_H) + \theta], \quad (2.31)$$

$$\delta(\tau_H) = 2\pi\tau_H - C_{oc}\sin[\delta(\tau_H) + \theta], \quad (2.32)$$

где $i_H(\tau_H)$ – характеристика автодетектирования АГ (сокращённо ХАД); $a_H(\tau_H)$ – амплитудная характеристика АГ (АХА); $\chi_H(\tau_H)$ – частотная характеристика АГ (ЧХА); $\delta(\tau_H)$ – фазовая характеристика АГ (ФХА); $i_{0m} = \Gamma K_0$, $a_{1m} = \Gamma K_a$, $\chi_m = \Gamma L_a$ – амплитудные значения соответствующих автодинных откликов; $K_0 = k_0 k_{H0}$, $K_a = k_a k_{Ha}$, $L_a = l_a l_{Ha}$ – коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты генерации; $k_0 = \eta\alpha_{01}/\alpha_{11}$, $k_a = \eta/\alpha_{11}$, $l_a = \eta/Q_H$ – коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты изохронного и изодромного АГ, у которого $\gamma = \rho = 0$; k_{H0} , k_{Ha} , l_{Ha} – нормированные относительно k_0 , k_a , l_a коэффициенты автодетектирования, автодинного усиления и девиации частоты реального АГ, у которого $\gamma \neq 0$, $\rho \neq 0$, а также имеет место явление частотного детектирования, когда $\varepsilon_{01} \neq 0$:

$$k_{H0} = \frac{1 - \kappa_{чд}\gamma}{1 - \gamma\rho} \sqrt{1 + \kappa_{см}^2}, \quad k_{Ha} = \frac{\sqrt{1 + \rho^2}}{1 - \gamma\rho}, \quad l_{Ha} = \frac{\sqrt{1 + \gamma^2}}{1 - \gamma\rho}; \quad (2.28)$$

$\psi_0 = \arctg(\kappa_{см})$, $\psi_1 = \arctg(\rho)$, $\theta = \arctg(\gamma)$ – углы фазового смещения автодинных изменений сигнала автодетектирования, амплитуды и частоты автоколебаний; $\kappa_{чд} = \varepsilon_{01}\alpha_{11}/\alpha_{01}Q_H$ – коэффициент частотного детектирования автодинных изменений частоты в изменения среднего значения тока активного элемента; $\kappa_{см} = [(\rho - \kappa_{чд})/(1 - \kappa_{чд}\gamma)]$ – коэффициент амплитудно-частотного смещения автодинного отклика по изменению смещения на АЭ; $\tau_H = \omega_0\tau$ – нормированное (безразмерное) время. Влияние внутренних свойств АГ на его основные параметры рассмотрено в диссертации с построением объёмных диаграмм.

Для удобства анализа свойств АГ предложено использовать амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), отражающая взаимную связь ЧХА и АХА [2]. Аналогично построена «автодетекторно-частотная» характеристика (ХАЧ). В диссертации выполнен анализ влияния внутренними параметрами АГ и параметров внешней обратной связи на форму эллипса.

ты L_a относительные амплитуды a_m и χ_m изменений $a_n(\tau_n, t)$ и $\chi_n(\tau_n, t)$, а также функциональный блок набега фазы отражённого излучения за время τ_n : $\delta(t, \tau) \equiv \delta(\tau_n, t)$. Блок « C_{oc} » на схеме характеризует глубину внешней обратной связи, выполняя операцию произведения двух величин: времени запаздывания $\tau \equiv \tau(t)$ и амплитуды автодинных изменений частоты $\Delta\omega_{ma}$.

С учетом равномерного спектрального распределения шумов внутренних источников АЭ, получены формулы для расчета в полосе частот ΔF эффективных значений частотного шума $\Delta f_{эфф}$, относительных уровней шума амплитуды колебаний $a_{шэф}$ и среднего значения флуктуаций тока $i_{шэф}$ смещения АЭ, для определения предельных энергетических потенциалов $\Pi_{пр}$ АД при регистрации сигналов по изменению амплитуды $\Pi_{пр}^{(a)}$ и в цепи смещения АЭ $\Pi_{пр}^{(i)}$:

$$\Delta f_{эфф} = (\overline{|\Delta f(t)|^2})^{1/2} = [2f_0(1 + \gamma^2) / Q_n(1 - \gamma\rho)] \sqrt{2kT_{ш}M_{ш}\Delta F / P_0}, \quad (3.8)$$

$$a_{шэф} = (\overline{|a_{ш}(t)|^2})^{1/2} = [2(1 + \rho^2) / \alpha_{11}(1 - \gamma\rho)] \sqrt{2kT_{ш}M_{ш}\Delta F / P_0}, \quad (3.9)$$

$$i_{шэф} = (\overline{|i_{ш}(t)|^2})^{1/2} = [2k_{01}(1 + \kappa_{см}^2)^{1/2}(1 - \gamma\kappa_{чд}) / (1 - \gamma\rho)] \sqrt{2kT_{ш}M_{ш}\Delta F / P_0}, \quad (3.10)$$

$$\Pi_{пр}^{(a)} = 1 / \overline{|a_{ш}(t)|^2}, \quad \Pi_{пр}^{(i)} = 1 / \overline{|i_{ш}(t)|^2}, \quad (3.11)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T_{ш}$ – эквивалентная шумовая температура АЭ; $M_{ш}$ – мера шума АЭ; P_0 – колебательная мощность АЭ.

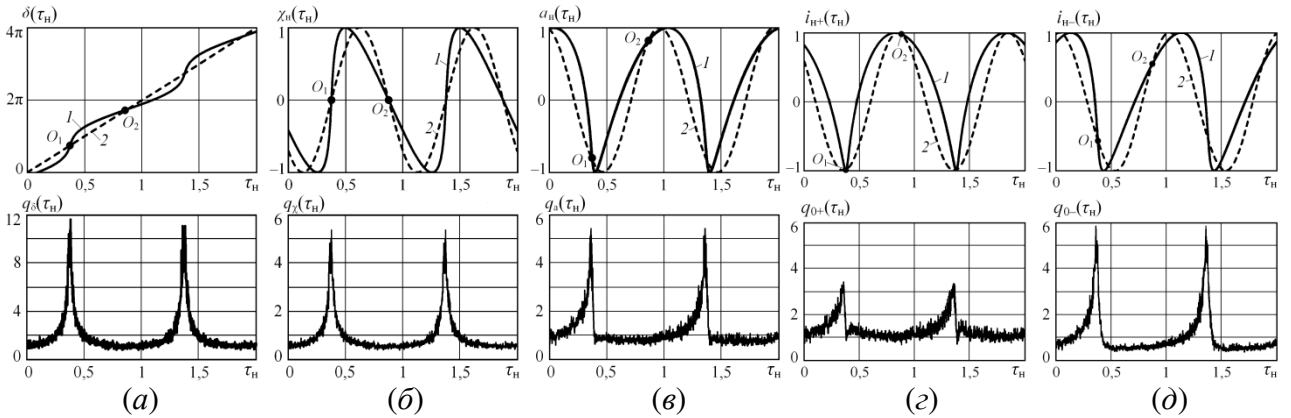


Рис. 3.2. ФХА (а), ЧХА (б), АХА (в) и ХАД (г, д), а также соответствующие им шумовые характеристики $q_\delta(\tau_n)$, $q_\chi(\tau_n)$, $q_a(\tau_n)$ и $q_{0\pm}(\tau_n)$

Результаты расчетов ФХА $\delta(\tau_n)$, ЧХА $\chi_n(\tau_n)$, АХА $a_n(\tau_n)$ и ХАД $i_n(\tau_n)$, а также относительных изменений среднеквадратических уровней фазового $q_\delta(\tau_n) = \overline{|\delta_{ш}(\tau_n, t)|} / \overline{|\delta_{ш}(O_2)|}$, частотного $q_\chi(\tau_n) = \overline{|\chi_{ш}(\tau_n, t)|} / \overline{|\chi_{ш}(t)|}$, амплитудного $q_a(\tau_n) = \overline{|a_{ш}(\tau_n, t)|} / \overline{|a_{ш}(t)|}$ шума и шума в цепи смещения $q_{i\pm}(\tau_n) = \overline{|i_{ш}(\tau_n, t)|} / \overline{|i_{ш}(t)|}$ АЭ в зависимости от нормированного времени τ_n до отражающей поверхности при принятых выше значениях γ , ρ , $\kappa_{чд}$ и величине параметра обратной связи $C_{oc} = 0,8$ представлены соответственно в виде графиков на рис. 3.2. Здесь $\delta_{ш}(O_2)$ – среднеквадратический уровень фазового шума в точке O_2 при заданной величине параметра C_{oc} .

Получена формула для расчета динамического диапазона d_a АГ при регистрации сигнала по изменению амплитуды колебаний или в цепи смещения АЭ:

$$d_a = \Gamma_{\text{пр}} \sqrt{\Pi_{\text{пр}}} = N_{\text{пр}} / N, \quad (3.17)$$

где d_a определяется как отношение предельного уровня сигнала, при котором начинаются скачки, к уровню собственных шумов АГ; $\Gamma_{\text{пр}}$ – предельное значение коэффициента Γ отражения, при котором начинаются скачки выходного сигнала АГ; $N_{\text{пр}}$ – предельное расстояние, выраженное в количестве полуволн излучения, до которого скачки сигналов АГ могут отсутствовать:

$$N_{\text{пр}} = \left[Q_n (1 - \gamma p) \sqrt{\Pi_{\text{пр}}} \right] / \left[2\pi\eta \sqrt{1 + \gamma^2} \right]. \quad (3.18)$$

В главе 4 представлены результаты теоретических исследований автодинных параметров и характеристик КВЧ генераторов, стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором. На рис. 4.1, а, б и рис. 4.2 представлены соответственно функциональная, эквивалентные общая и конкретная с резистивной связью между резонаторами схемы стабилизированного автодина. На рис. 4.2 индексами 1 обозначены величины эквивалентных пассивных элементов основного рабочего резонатора, а индексами 2 – стабилизирующего.

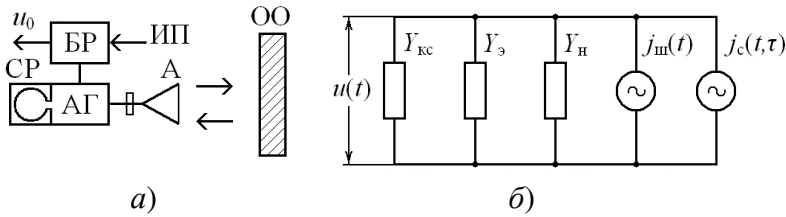


Рис. 4.1. Функциональная (а) и эквивалентная (б) схемы стабилизированного АГ: А – антенна; АГ – автодинный генератор; БР – блок регистрации автодинного отклика; СР – стабилизирующий резонатор; ОО – отражающий объект локации

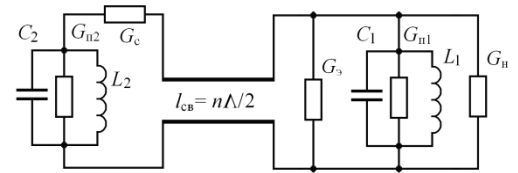


Рис. 4.2. Конкретизированная эквивалентная схема АГ с резистивной связью между рабочим и стабилизирующим резонаторами

На рис. 4.3 представлены графики нормированных проводимостей $g_{\text{кc}}(v)$, $b_{\text{кc}}(v)$ и их производных $\varepsilon_{\text{кc}}(v)$, $q_{\text{кc}}(v)$ КС в окрестности собственной частоты ω_{c2} стабилизирующего резонатора при $\beta_2 = 1$ и различных значениях величины β_1 , которые получены на основе анализа эквивалентной схемы стабилизированного автодинного генератора (САГ), представленной на рис. 4.2. Здесь $v = 2Q_{c2}(\omega - \omega_{c2}) / \omega_{c2}$ – относительная отстройка; β_1 и β_2 – коэффициенты, характеризующие степень связи рабочего и стабилизирующего резонаторов с линией передачи. Для схемы рис. 4.1, б, получены укороченные выражения для амплитуды и частоты колебаний, а также тока АЭ. Затем выражения для входящих в них параметров уточнялись с учётом конкретизированной эквивалентной схемы рис. 4.2.

После линеаризации нелинейных членов этих выражений в окрестности стационарного режима САГ получена система уравнений для определения относительных изменений амплитуды $a_1 = \Delta A / A_0$ и частоты генерации $\chi = \Delta \omega / \omega_0$, а также тока $i = \Delta I_s / I_{s0}$ смещения АЭ:

$$\alpha_{11}a_1 + \varepsilon_{11}\chi + \varepsilon_{2н}\chi^2 = \Gamma\eta\cos\delta(t,\tau) + a_c(t), \quad (4.16)$$

$$\beta_{11}a_1 + \xi_{11}\chi = -\Gamma\eta\sin\delta(t,\tau) - a_s(t), \quad (4.17)$$

$$\alpha_{01}a_1 + \varepsilon_{01}\chi = i, \quad (4.18)$$

где $\varepsilon_{11} = \varepsilon_3 + \varepsilon_{кк}$ – параметр, определяющий неизодромность САГ, т.е. учитывающий влияние изменений частоты на амплитуду колебаний через проводимость АЭ ε_3 и частотную дисперсию КС; $\varepsilon_{кк} = 2\beta_1\beta_2(1+\beta_2)Q_{c2}v[(1+\beta_2)^2 + v^2]^{-2}$; $\varepsilon_{2н}$ – параметр нелинейности амплитудной характеристики САГ, обусловленной зависимостью резистивной проводимости КС от частоты генерации: $\varepsilon_{2н} = 4\beta_1\beta_2 / (1+\beta_2)^3$; $\xi_{11} = \xi_3 + \xi_{кк}$ – параметр стабилизации частоты, учитывающий частотную крутизну реактивной проводимости АЭ ξ_3 , а также колебательной системы $\xi_{кк} = \xi_1 + \xi_2$ САГ, рабочего $\xi_1 = Q_{н1}$ и стабилизирующего $\xi_2 = \beta_1\beta_2Q_{c2}[(1+\beta_2)^2 - v^2][(1+\beta_2)^2 + v^2]^{-2}$ резонаторов от частоты относительной расстройки v .

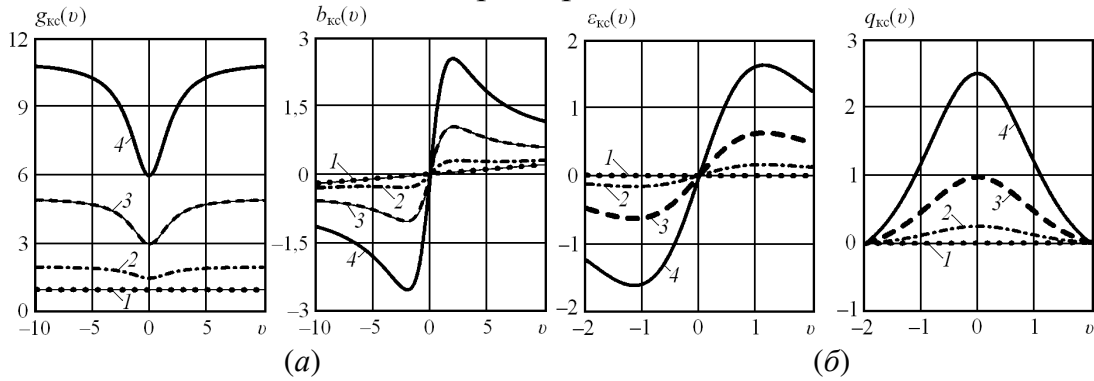


Рис. 4.3. Графики нормированных проводимостей $g_{кк}(v)$, $b_{кк}(v)$ и их производных $\varepsilon_{кк}(v)$, $q_{кк}(v)$, рассчитанные при $Q_{н1} = 100$, $Q_{c2} = 5000$ и следующих параметрах связи: $\beta_1 = 0$ (кривые 1); $\beta_1 = 1$ (кривые 2); $\beta_1 = 4$ (кривые 3); $\beta_1 = 10$ (кривые 4)

Величины коэффициентов автодинной девиации обычного L_a и стабилизированного $L_a^{ст}$ АД, которые определяют значения автодинной девиаций частоты $\Delta\omega_m = \Gamma\omega_0L_a$ и $\Delta\omega_{ма}^{ст} = \Gamma\omega_0L_a^{ст}$ соответственно, значительно отличаются. Степень отличия этих величин найдена в виде:

$$S_f = \frac{L_a}{L_a^{ст}} = \frac{\Delta\omega_{ма}}{\Delta\omega_{ма}^{ст}} = \frac{C_{ос}}{C_{ос}^{ст}} = \frac{Q_{экв}}{Q_{н1}} = 1 + \frac{Q_{c2}\beta_1\beta_2}{Q_{н1}(1+\beta_2)^2}, \quad (4.25)$$

где $Q_{экв} = Q_{экв}(v=0) = Q_{н1} + Q_{c2}[\beta_1\beta_2 / (1+\beta_2)^2]$ – эквивалентная добротность КС САГ. Полученная величина S_f названа «коэффициентом стабилизации».

Получены решения системы (4.19) – (4.21) для автодинных откликов в виде зависимостей от величины v нормированной расстройки. Из результатов анализа следует, что величины коэффициентов автодетектирования и автодинного усиления $K_{н}(v)$ и автодинной девиации частоты $L_{н}(v)$ внутри полосы стабилизирующего резонатора, когда $|v| < 1$, изменяется слабо.

Рассчитаны частотный отклик $\chi(t) = -\Gamma L_{н1}\sin[\delta(t,\tau) + \theta]$ и отклик и в цепи питания и по изменению амплитуды в условиях «сильного» отражённого излучения: $a_{н}(\tau_{н}) = a(\tau_{н}) / a_m = -a_{m2} + \cos[\delta(t,\tau) - \psi] + a_{m2}\cos 2\delta(t,\tau)$, где $a_{m2} = \Gamma k_{ан}$. Установ-

лено появление в отклике САГ постоянной составляющей и второй гармоники основной частоты автодинного сигнала.

Выполнен анализ влияния внутренних параметров АГ на уровень шумов автономного САГ. Полученные выражения для $\chi_{\text{ш}}(v, t)$, $a_{\text{ш}}(v, t)$ и $i_{\text{ш}}(v, t)$ без учёта «нелинейности» автодина по амплитуде отличаются от выражений (2.46) одноконтурного АГ их частотной зависимостью от величины v .

Получены выражения для расчета эффективных значений частотного шума $\Delta f_{\text{эфф}}(v)$, относительных уровней шума амплитуды колебаний $a_{\text{ш эф}}(v)$, среднего значения флуктуаций тока $i_{\text{ш эф}}(v)$ смещения АЭ, а также предельного энергетического потенциала $\Pi_{\text{пр}}(v)$ АГ при регистрации сигналов по изменению амплитуды $\Pi_{\text{пр}}^{(a)}(v)$ и в цепи смещения АЭ $\Pi_{\text{пр}}^{(i)}(v)$.

Результаты вычислений согласно выражениям описанных выше величин для САГ при точной настройке ($v=0$) представлены в таблице 4.1. Исходные данные для расчётов имели следующие значения: $\gamma=1$; $\varepsilon_s=10$; $\alpha_{11}=0,05$; $\varepsilon_{01}=0,5$; $\alpha_{01}=0,5$; $T_{\text{ш}}=300$ К; $M_{\text{ш}}=20$ дБ; $\xi_{11}(v=0)=Q_{\text{экр}}=2000$; $\Delta F=1000$ Гц; $f_0=37,5$ ГГц; $P_0=0,012$; $A_0=3$ В; $I_{s0}=0,2$ А. В первой строчке этой таблицы для сравнения приведены данные, рассчитанные для обычного АГ.

Получены выражения для нормированных изменений частоты $\chi_{\text{н}}(v, \tau_{\text{н}}, t)$, амплитуды $a_{\text{н}}(v, \tau_{\text{н}}, t)$ и величины смещения $i_{\text{н}}(v, \tau_{\text{н}}, t)$ на АЭ, а так же соответствующие им шумовые составляющие $\chi_{\text{шн}}(v, t)$, $a_{\text{шн}}(v, t)$, $i_{\text{шн}}(v, t)$ в случае точной настройки стабилизирующего резонатора, когда $v=0$, полностью соответствуют аналогичным выражениям, полученным для одноконтурных АГ.

Таблица 4.1. Расчетные значения шумовых параметров АГ

| Тип генератора | $\Delta A_{\text{эфф}}$ (мкВ) | $\Delta I_{\text{эфф}}$ (мкА) | $\Delta f_{\text{эфф}}$ (Гц) | $\Pi_{\text{пр}}^{(a)}$ (дБ) | $\Pi_{\text{пр}}^{(i)}$ (дБ) |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Нестабилизированный | 30,3 | 1,01 | 479,6 | 99,9 | 105,9 |
| Стабилизированный | 28,3 | 0,94 | 12,52 | 100,5 | 106,5 |

Выражения, полученные для определения динамического диапазона САГ, идентичны выражениям для обычного АГ. Отличия ширин динамического диапазона определяется практически величиной коэффициента стабилизации S_f частоты.

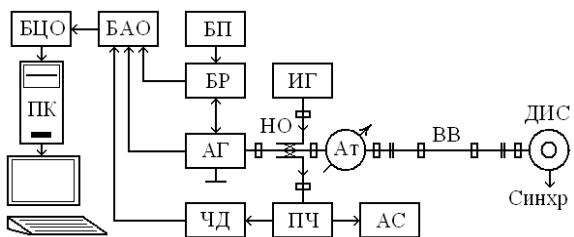


Рис. 5.1. Блок-схема экспериментальной установки для изучения АГ

В главе 5 представлены результаты экспериментальных исследований обычных и стабилизированных по частоте автодинных модулей. Цель этих исследований – проверка основных выводов теоретического анализа указанных АГ.

Блок схема экспериментальной установки приведена на рис. 5.1. Исследуемый АГ связан с доплеровским имитатором сигнала ДИС волноводным трактом ВВ, через переменный аттенуатор Ат, и направленный ответвитель НО. Отрезок волновода ВВ требуемой длины предназначен для моделирования запаздывания отраженного излучения. Боковые плечи направленного ответвителя НО связаны через развязывающие вентили с преобразователем частоты ПЧ, переносящим спектр излучения

АГ на частоту примерно 1,0 GHz, и измерительным генератором СВЧ ИГ. Выходной сигнал преобразователя частоты ПЧ далее следует на широкополосный частотный дискриминатор ЧД и анализатор спектра АС типа USB-SA44B. Питание от стабилизированного блока питания БП на исследуемый АГ подаётся через блок регистрации БР автодинного сигнала, который предназначен для преобразования автодинных вариаций среднего значения тока АЭ генератора в напряжение выходного сигнала.

Сигналы с выходов блока регистрации БР (сигнал автодетектирования $a_0(\tau)$), детектора огибающей (отклик по изменению амплитуды $a_1(\tau)$) колебаний генератора АГ) и частотного дискриминатора ЧД (отклик по изменению частоты колебаний $\chi(\tau)$) подаются для раздельного усиления и фильтрации в блок аналоговой обработки БАО. С выхода БАО они следуют на входы каналов аналогового ввода модуля блока цифровой обработки БЦО. Цифровая обработка сигналов выполнена на ПК с помощью виртуального прибора, созданного в среде LabVIEW.

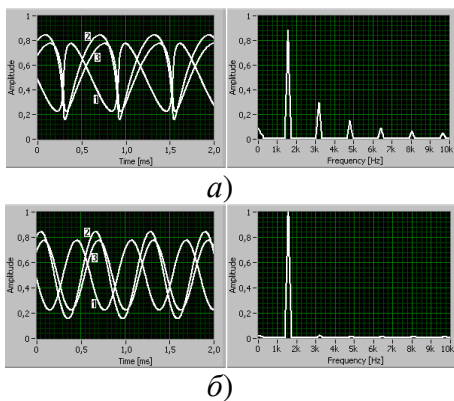


Рис. 5.8. Осциллограммы (слева) сигналов по изменению частоты (кривые 1), амплитуды колебаний (кривые 2), сигнала автодетектирования (кривые 3) и спектрограммы (справа) для отклика по изменению амплитуды колебаний обычного (а) АГ и САГ (б)

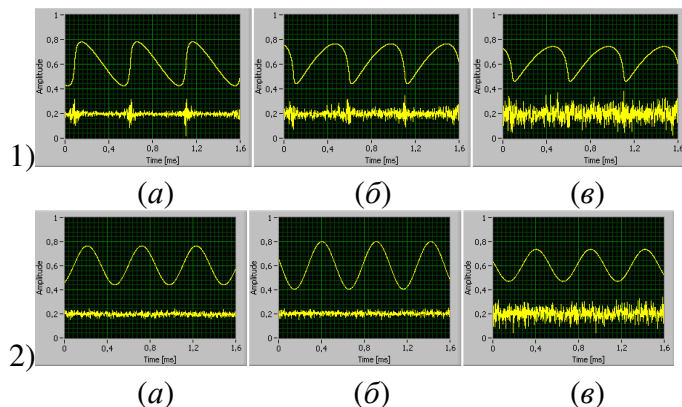


Рис. 5.15. Осциллограммы сигналов (верхние осциллограммы) и шумовых дорожек (нижние осциллограммы) обычного автодинного генератора (ряд 1) и стабилизированного внешним высокочастотным резонатором автодинного генератора (ряд 2). В качестве объекта испытаний использовался автодинный модуль «Тигель-08» 8-мм диапазона

Получены спектрограммы СВЧ колебаний выходных сигналов обычного и стабилизированного АГ от движущегося отражателя. Ширина спектра СВЧ колебаний в первом случае составляла $\Delta f_{\text{сп}} = 2,5$ МГц, а во втором – около 40 кГц.

Из спектрограмм (см. рис. 5.8) видно, что уровень высших гармонических составляющих у САГ значительно ниже, чем у обычного автодина. Нелинейные искажения сигналов обычного АГ составляли величину около 45%, а стабилизированного модуля – менее 5%.

На рис. 5.15 представлены осциллограммы, на которых верхний след показывает форму сигнала по изменению частоты (а), амплитуды (б) и автодетектирования (в), а нижний след – дорожку высокочастотного шума соответствующего канала. В первом ряду скриншотов с монитора ПК (см. рис. 5.15.) представлены осциллограммы сигналов для случая нестабилизированного модуля при величине затухания аттенюатора $D_{\text{ат}} = 17,2$ дБ, во втором – при прежнем значении затухания атте-

нюатора для стабилизированного модуля.

В таблице 5.2 представлены результаты измерения шумов, отнесённых к уровню соответствующего шума модуля в автономном режиме, когда аттенюатор закрыт. Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанной модели АГ КВЧ диапазона.

Таблица 5.2. Измеренные значения уровней флуктуаций в «пике» и на «плато» шумовых характеристик АД

| Уровень шума → | в «пике» (точке O_1) | | | на «плато» (в точке O_2) | | |
|---------------------|-------------------------|------------|------------|-----------------------------|------------|------------|
| Тип модуля ↓ | $q_x(O_1)$ | $q_a(O_1)$ | $q_i(O_1)$ | $q_x(O_2)$ | $q_a(O_2)$ | $q_i(O_2)$ |
| Нестабилизированный | 2,7 | 2,0 | 1,2 | 0,55 | 0,64 | 0,96 |
| Стабилизированный | 4,8 | 3,0 | 1,5 | 0,53 | 0,76 | 0,76 |
| Данные расчета | 5,0 | 3,3 | 2,2 | 0,55 | 0,74 | 0,84 |

В главе 6 приведено описание применения АГ в СБРЛ, выполненной на базе двух модулей «Тигель-08», стабилизированных дополнительным резонатором. Представлены результаты натурных испытаний на сортировочной горке опытного образца СБРЛ.

Дано описание применения автодинов в бесконтактных датчиках вибраций на примере модуля «Тигель-08». Выполнены исследования уровня нелинейных искажений выходных сигналов в условиях слабой и сильной внешней обратной связи. Даны рекомендации по правильному использованию автодинных датчиков вибраций.

Представлены результаты исследований возможности применения автодинного приёмо-передающего модуля в качестве бортового приёмо-ответчика аэрологического шара-зонда в системе радиозондирования атмосферы. В качестве объекта исследований использовался штатный СВЧ модуль сантиметрового диапазона, выполненный на транзисторе.

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические результаты, которые можно квалифицировать как решение актуальной задачи по исследованию гибридно-интегральных автодинных модулей миллиметрового диапазона, в том числе стабилизированных по частоте внешним высокочастотным резонатором, разработке рекомендаций по созданию перспективных вариантов модулей и их использованию в различных автодинных системах, датчиках и измерителях.

Основные выводы по работе состоят в следующих положениях:

1. На основе выполненного обзора литературы по автодинной тематике и вопросам конструирования СВЧ и КВЧ генераторных модулей намечены перспективы развития данного направления, выбран объект и сформулированы основные задачи исследований.

2. Разработана математическая модель для анализа автодинного эффекта в одноконтурной автоколебательной системе, находящейся под воздействием малого уровня собственных шумов и отражённого от объекта излучения, которая отличается учётом не только неизохронности генератора и явления автодетектирования изменений амплитуды колебаний, но и влияния изменений частоты генерации автодина на изменения амплитуды колебаний и величины смещения (тока или напряжения) активного элемента. На основе данной модели проведено рассмотрение

широкого круга вопросов, которые позволили определить возможности и перспективы дальнейшего развития теории и практики автодинов КВЧ диапазона. Основные новые результаты этих исследований состоят в следующем.

2.1. В рамках разработанной модели для удобства описания процессов в генераторах КВЧ диапазона предложено использовать ряд новых в теории автодинов терминов.

Для генераторов, у которых выражено явление зависимости амплитуды от изменений частоты колебаний, предложено использование термина *неизодромный генератор*. Данное явление характеризуется *коэффициентом неизодромности*, который определяется как отношение величины параметра частотной чувствительности амплитуды колебаний генератора к значению параметра стабилизации частоты (нагруженной добротности колебательной системы).

При анализе процессов автодетектирования в автодинном генераторе, в котором одновременно происходят преобразования, как изменений амплитуды, так и частоты колебаний в постоянную составляющую смещения активного элемента, предложено использование коэффициента *амплитудно-частотного смещения*. При анализе отдельных составляющих процесса автодетектирования в автодине обосновано использование понятий коэффициентов *амплитудного* и *частотного детектирования*.

Предложенные термины *неизодромность* и *частотное детектирование* являются дуальными относительно понятий неизохронность и амплитудное автодетектирование, которые, как известно из литературы, определяются как зависимость частоты колебаний генератора и сигнала в цепи смещения активного элемента от амплитуды генерируемых колебаний.

Нормированную зависимость величины выходного сигнала, полученного в цепи питания генератора, от расстояния до отражающего объекта предложено называть *характеристикой автодетектирования* (ХАД).

2.2. Автодинный генератор, находящийся под воздействием отражённого от объекта локации собственного излучения, по отношению к изменениям режима стационарных колебаний может быть представлен в виде системы с внутренней и внешней обратной связью. В этой системе внешняя обратная связь, обусловленная запаздывающим воздействием отражённого излучения, характеризуется параметром *внешней* обратной связи, который определяется как произведение времени запаздывания на величину зависящей от уровня отражённого излучения автодинной девиации частоты. Внутренняя обратная связь автодина, обусловленная взаимосвязанными процессами преобразования изменений частоты генерации в изменения амплитуды колебаний и обратно, характеризуется *параметром внутренней обратной связи*, который определяется как произведение коэффициентов неизохронности и неизодромности. Если данные коэффициенты одного знака, то такая система имеет *положительную внутреннюю обратную связь*, а если они разных знаков, то – *отрицательную*.

2.3. Из анализа условий внутренней и внешней устойчивости функционирования автодинной системы «генератор – отражающий объект» следует, что кроме известного требования к знаку прочности предельного цикла генератора, необходимо также, чтобы коэффициент внутренней положительной обратной связи за счёт не-

изохронности и неизодромности генератора, а также параметр внешней обратной связи автодина были меньше единицы.

2.4. В результате теоретических и экспериментальных исследований автодинных КВЧ генераторов показана зависимость их основных параметров, таких, как коэффициентов автодинного усиления, девиации частоты и автодетектирования, а также автодинных характеристик и параметра внешней обратной связи от их внутренних свойств. При этом данные свойства автодинов определяются не только известными параметрами, такими как прочность предельного цикла, внешняя и нагруженная добротности колебательной системы, коэффициент амплитудного автодетектирования и неизохронность, но и такими параметрами автодинов, как неизодромность, коэффициент частотного автодетектирования и коэффициент внутренней обратной связи.

2.5. Разработанная модель автодинного генератора позволяет по результатам анализа особенностей формирования экспериментально полученных автодинных характеристик при различных уровнях отражённого излучения определить внутренние свойства и параметры КВЧ генераторов. К этим параметрам относятся прочность предельного цикла, внешняя и нагруженная добротности колебательной системы, коэффициент амплитудного автодетектирования и неизохронность генератора, а также коэффициенты неизодромности и частотного автодетектирования.

2.6. Внутренние параметры генератора, такие как его неизохронность и неизодромность, оказывают влияние на относительное фазовое смещение частотных (ЧХА) и амплитудных (АХА) характеристик автодинной системы. Явление частотного детектирования вызывает дополнительное смещение фазы ХАД. Степень ангармонических искажений автодинных характеристик зависит не только от величины параметра внешней обратной связи (с увеличением этого параметра они растут), но и от внутренних параметров генератора.

2.7. Амплитудно-частотные (АЧХ) и автодетекторно-частотные (ХАЧ) характеристики автодинных систем, полученные перемещением изображающей точки при изменении относительного расстояния до отражающего объекта, являются замкнутыми кривыми в форме эллипсов. Параметры этих эллипсов определяются значениями внутренних параметров автодинных генераторов, а неравномерность перемещения изображающей точки зависит от величины параметра внешней обратной связи. Проекции этих характеристик на ортогональные оси декартовой системы координат дают соответствующие АХА, ХАД и ЧХА.

2.8. Результаты теоретических исследований подтверждены данными экспериментальных исследований, полученными для гибридно-интегральных модулей «Тигель-08» 8-мм диапазона длин волн, выполненных на основе планарных двухмезовых диодах Ганна.

3. На основе разработанной модели автодина с одноконтурной колебательной системой выполнен анализ шумовых параметров и характеристик, при этом получен ряд новых результатов, которые сводятся к следующим.

3.1. В случае пренебрежимо малых по сравнению с единицей значений параметра внешней обратной связи автодина зависимость среднеквадратического уровня как частотных, так и амплитудных шумов от относительного расстояния до отражающего объекта практически отсутствует. Однако в случае сильной обратной

связи, когда величина этого параметра соизмерима с единицей, в автодинном генераторе наблюдается периодическая, кратная половине длины волны излучения нестационарность уровней шумов, которая выражается в их зависимости от положения отражающей поверхности. При этом в одних положениях отражателя уровни шума по отношению к случаю слабой обратной связи могут заметно снижаться, а в других – значительно расти, причём увеличению уровня шума соответствует более крутые участки частотной характеристики автодина, а его уменьшению – более пологие.

Причиной такого поведения шумовых характеристик автодинной системы, как установлено, является нелинейность взаимодействия формируемого отклика автодина на воздействие отражённого излучения и внутренних частотных шумов генератора. Последние, проходя по цепи внешней обратной связи «генератор – отражающий объект – генератор», преобразуются в фазовые шумы и вызывают соответствующие изменения уровней флуктуаций автодинных изменений частоты и амплитуды колебаний, а также сигнала в цепи смещения активного элемента.

3.2. На основе численных расчётов шумовых характеристик автодинов установлено, что, несмотря на периодическую нестационарность уровня шумов при воздействии отражённого излучения, среднее значение уровня шума за период автодинного сигнала во всех случаях, как малого, так и большого отношения сигнал/шум, сохраняется практически неизменным и равным уровню шумов автономного генератора.

3.3. Показано, что одноконтурный автодинный генератор, у которого внутренняя обратная связь за счёт неизохронности и неизодромности является отрицательной, по сравнению с изохронным генератором может обеспечивать снижение уровня шума и выигрыш в величине динамического диапазона на несколько дБ.

3.4. Выявленные особенности формирования автодинных и шумовых характеристик генераторов необходимо учитывать при расчёте энергетического потенциала систем и при обработке выходных сигналов автодинных датчиков и измерителей. Например, при работе автодинных радиолокаторов в условиях высокого уровня отраженного излучения и (или) большого расстояния до объекта ангармонические искажения сигналов и зависимость уровня шума автодина от положения отражателя могут быть причинами, которые снижают точность измерений параметров движения объектов и ограничивают дальность их действия.

4. Для анализа процессов в автодинных генераторах КВЧ диапазона, колебательная система которых представлена совокупностью основного (рабочего) резонатора и связанного с ним стабилизирующего высокочастотного резонатора, разработана математическая модель, описывающая поведение стабилизированного по частоте автодина в условиях одновременного воздействия слабого отражённого от объекта излучения и собственных шумов. Основные новые результаты исследований стабилизированных автодинов сводятся к следующим.

4.1. Установлено, что основные параметры стабилизированных автодинов, такие как коэффициенты автодинного усиления и автодетектирования у них практически такие же, как и у обычных (нестабилизированных) автодинов. Кроме того, при величине параметра внешней обратной связи соизмеримой с единицей им также свойственны ангармонические искажения сигналов, как и обычным автодинов.

4.2. При резистивной связи стабилизирующего резонатора с основным рабочим резонатором, стабилизирующее действие, уменьшающее величину автодинной девиации частоты, проявляется в наибольшей степени при точной настройке стабилизирующего резонатора на частоту генерации автодина. По сравнению с обычным автодином стабилизированный автодинный генератор обеспечивает значительное уменьшение степени искажений сигналов и уровня частотных шумов, что способствует улучшению такого важного параметра автодинной СБРЛ, как динамический диапазон. Выигрыш в динамическом диапазоне, определяемом величиной коэффициента стабилизации частоты, может составлять при сильной связи между резонаторами 20...30 и более дБ. При этом уровни амплитудного шума и шума в цепи смещения снижаются незначительно. Кроме того, часть колебательной мощности активного элемента генератора затрачивается на компенсацию потерь в цепи стабилизации. Поэтому выигрыш в величине энергетического потенциала стабилизированного автодина по сравнению с обычным автодином сравнительно небольшой и составляет на практике 3...5 дБ.

Степень уменьшения девиации частоты стабилизированных автодинов предложено характеризовать *коэффициентом стабилизации*, который показывает во сколько раз величина автодинной девиации частоты исследуемого автодина меньше, чем у обычного автодинного генератора при одном и том же уровне отражённого излучения.

4.3. Установлено, что ангармонические искажения сигналов стабилизированного автодина, которые наблюдаются при увеличении уровня отражённого излучения, в отличие от обычных (одноконтурных) автодинов, прежде всего, обусловлены частотной дисперсией резистивной проводимости колебательной системы. Природа данных искажений состоит в том, что при автодинных изменениях частоты автоколебаний происходит дополнительная модуляция амплитуды генерации на каждом скате частотной характеристики проводимости с удвоенной частотой. Эта модуляция накладывается на естественные автодинные изменения амплитуды, которые обусловлены изменениями фазы отражённой волны.

5. В плане практического применения результатов диссертационной работы выполнен ряд исследований прикладного характера и разработан автодинный радиолокатор, при этом получены новые научные результаты, состоящие в следующем.

5.1. Предложена методика инженерного расчёта дифференциальных параметров используемых в автодинных генераторах активных элементов (диодов Ганна, ЛПД), основанная на применении известных из литературы для этих элементов нормированных аппроксимационных характеристик, учитывающих физическую структуру кристаллов, а также условия генерации (амплитуду и частоту колебаний, параметры смещения).

5.2. Рассмотрены вопросы эффективности применения стабилизированных по частоте генераторов в автодинных радиолокаторах в условиях их взаимодействия с излучением, отражённым от точечной и поверхностно-распределённой цели.

5.3. Разработан опытный образец автодинного радиолокатора, выполненный на основе стабилизированного по частоте двухдиодного генератора для решения задач определения параметров движения вагонов на сортировочной горке. Показано, что

благодаря возможности получения сдвинутых по фазе двух автодинных сигналов, а также значительно меньшей величины автодинной девиации частоты автоколебаний, данные автодины обеспечивают более широкие функциональные возможности при их применении в системах ближней радиолокации, а также улучшение ряда их технических характеристик.

5.4. Точность измерения с помощью автодинных датчиков параметров виброперемещений и динамический диапазон этих измерений возрастают с увеличением уровня отражённого от объекта контроля излучения. При проведении вибрационных измерений в этих условиях необходимо учитывать не только значительные отличия величины чувствительности к виброперемещениям и динамического диапазона из-за ангармонических искажений сигнальных характеристик, но и отличия уровня шума в выбранных для измерений рабочих точках. Особый интерес при этом представляет вариант регистрации автодинного сигнала по изменениям частоты, обеспечивающий стабильность положения рабочей точки и наиболее высокую линейность сигнальной характеристики, хотя техническая реализация этого варианта исполнения датчика представляется наиболее сложной.

5.5. Полученные результаты исследований автодинов в режиме приёма запросного сигнала радиолокатора дали положительный ответ на вопрос о принципиальной возможности замены свержегенеративного приёмо-передатчика на автодинный в перспективных системах радиозондирования атмосферы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК

1. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов // Радиотехника. 2012. № 6. С. 24–42.
2. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Амплитудно-частотные характеристики автодинных СВЧ генераторов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2011. № 4 (511). С. 17–31.
3. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Влияние расстройки резонатора на автодинные характеристики стабилизированных СВЧ генераторов // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2011. Т. 54, № 11 С. 45–60.
4. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Экспериментальные исследования автодинных модулей на меза-планарных диодах Ганна КВЧ диапазона // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. 2012. № 2 (513). С. 17–36.
5. Носков В.Я., Игнатков К.А. Особенности шумовых характеристик автодинов при сильной внешней обратной связи // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 12. С. 112–124.
6. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 7. – Динамика формирования автодинных и модуляционных характеристик // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 6. С. 3–52.
7. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазо-

нов и их применение. Часть 8. Автодины со стабилизацией частоты внешним высокочастотным резонатором // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. № 12. С. 3–42.

Статьи в прочих журналах, тексты докладов в материалах конференций.

8. Игнатков К.А., Носков В.Я., Смольский С.М. Исследования особенностей автодинных сигналов СВЧ генераторов, стабилизированных внешним резонатором // Сб. трудов III ВНТК «Радиовысотометрия-2010». Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2010. С. 144–149.

9. Игнатков К.А., Носков В.Я., Черных О.А. Исследования сигналов автодинного радиолокатора с применением платформы сбора данных cDAQ-9172 в среде программирования LabView // 9-я МНПК «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments-2010». Москва: Российский Университет Дружбы Народов, 2010. С. 480–482.

10. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Результаты экспериментальных исследований автодинных СВЧ генераторов, стабилизированных внешним резонатором // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. С. 979–982.

11. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Особенности применений двухконтурных генераторов в автодинных радиолокаторах // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. С. 955–958.

12. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Эффективность использования стабилизированных СВЧ генераторов в автодинных радиолокаторах // 21-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2011. С. 983–985.

13. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Особенности автодинных сигналов стабилизированных СВЧ генераторов // 10-я МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». Самара: ООО «Книга», 2011. С. 116–118.

14. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A., Smolskiy S.M. Analysis of signals of stabilized autodynes // Telecommunication Sciences. 2011. V. 2, № 1. P. 5–16.

15. Носков В.Я., Игнатков К.А., Смольский С.М. Нелинейные искажения сигналов в стабилизированных автодинных СВЧ генераторах // Приборы и техника СВЧ. 2011. № 1. С. 31–39.

16. Ermak G.P., Popov I.V., Vasilev A.S., Varavin A.V., Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Radar Sensors for Hump Yard and Rail Crossing Applications // Telecommunication and Radio Engineering. 2012. V. 71, № 6. P. 567–580.

17. Носков В.Я., Игнатков К.А. Применение стабилизированного двухдиодного автодина в радиолокационном датчике для сортировочных горок // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2012. С. 893–896.

18. Носков В.Я., Иванов В.Э., Игнатков К.А., Кудинов С.И. Теоретические обоснования автодинного метода формирования ответного сигнала радиозонда по дальности // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2012. С. 897–899.

19. Кудинов С.И., Иванов В.Э., Носков В.Я., Игнатков К.А. Экспериментальные исследования автодинного режима приёмо-передающего устройства радиозонда МРЗ-3МК // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2012. С. 900–902.
20. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы / В.Э. Иванов, А.В. Гусев, К.А. Игнатков, С.И. Кудинов, В.Я. Носков, О.В. Плохих // 22-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2012. С. 3–12.
21. Носков В.Я., Игнатков К.А. О природе периодической нестационарности шумов в автодинных СВЧ генераторах // 11-я МНТК «Физика и технические приложения волновых процессов». Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. С. 133–135.
22. Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Autodyne signals in case of random delay time of the reflected radiation // Telecommunication and Radio Engineering. 2013. V. 72, № 16. P. 1521–1536.
23. Носков В.Я., Игнатков К.А. Анализ искажений сигналов автодинных СВЧ-датчиков вибраций // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2013. С. 1042–1045.
24. Носков В.Я., Игнатков К.А. Анализ шумовых характеристик автодинных СВЧ-датчиков малых перемещений // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2013. С. 1046–1048.
25. Носков В.Я., Игнатков К.А. Экспериментальные исследования сигналов автодинных СВЧ-датчиков вибраций // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2013. С. 1049–1050.
26. Носков В.Я., Игнатков К.А. Влияние внутренних параметров СВЧ генераторов, стабилизированных внешним высокочастотным резонатором, на их шумовые характеристики // 4-я ВНТК «Радиовысотометрия-2013». Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2013. С. 146–150.
27. Игнатков К.А. Расчет дифференциальных и эквивалентных параметров автодинных генераторов на основе аппроксимационных характеристик диодов Ганна // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2014. С. 992–993.
28. Игнатков К.А. Влияние частоты генерации на автодинные характеристики в рабочем диапазоне диодов Ганна // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь: Вебер, 2014. С. 1004–1005.

Подписано в печать 24.10.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,6.
Тираж 120 экз. Заказ №1673
Отпечатано в типографии ИПЦ УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4